

УДК 621.396.969

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126509

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ ОГЛЯДОВИМИ РАДІОЛОКАЦІЙНИМИ СТАНЦІЯМИ

Г. В. Худов

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри

Кафедра тактики радіотехнічних військ

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

вул. Сумська, 77/79, м. Харків, Україна, 61023

E-mail: 2345kh_hg@ukr.net

А. А. Звонко

Кандидат технічних наук, старший викладач

Кафедра ракетно-артилерійського озброєння

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

вул. Героїв Майдану, 32, м. Львів, Україна, 79026

E-mail: zvonko2008@ukr.net

С. М. Ковалевський

Кандидат технічних наук

Кафедра тактики радіотехнічних військ

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

вул. Сумська, 77/79, м. Харків, Україна, 61023

E-mail: kovalevskij65@ukr.net

В. М. Ліщенко

Ад'юнкт

Кафедра тактики радіотехнічних військ

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

вул. Сумська, 77/79, м. Харків, Україна, 61023

E-mail: lvnpo4ta@gmail.com

Ф. Ф. Зоц

Кандидат технічних наук

Кафедра озброєння радіотехнічних військ

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

вул. Сумська, 77/79, м. Харків, Україна, 61023

E-mail: fedorzots@gmail.com

Запропоновано введення в існуючу однопозиційну оглядову РЛС додаткового режиму рознесенного прийому та об'єднання однопозиційного та рознесеного прийому сигналів. Удосконалено алгоритм виявлення повітряного об'єкта при його опроміненні декількома передавачами. Розроблена схема виявлювача забезпечує прийом, узгоджену обробку ехо-сигналів сторонніх джерел, компенсацію різниць в затримці та частоті Доплера відносно роздільного об'єму оглядової РЛС та некогерентне вагове підсумовування. Встановлено, що найбільш ефективним є об'єднання двох, максимум трьох каналів прийому

Ключові слова: малорозмірний повітряний об'єкт, виявлення, прийом сигналу, однопозиційна система, багатопозиційна система, канал обробки

Предложено введение в существующую однопозиционную обзорную РЛС дополнительного режима разнесенного приема и объединение однопозиционного и разнесенного приема сигналов. Усовершенствован алгоритм обнаружения малоразмерных воздушных объектов при его облучении несколькими передатчиками. Разработанная схема обнаружителя обеспечивает прием, согласованную обработку эхо-сигналов внешних источников, компенсацию разности в задержке и частоте Доплера относительно разрешающего объема обзорной РЛС и некогерентное весовое суммирование. Установлено, что наиболее эффективным является объединение двух, максимум трех каналов приема

Ключевые слова: малоразмерный воздушный объект, обнаружение, прием сигнала, однопозиционная система, многопозиционная система, канал обработки

1. Вступ

В сучасних умовах рішення задачі побудови надійної системи протиповітряної оборони значно ускладнюється у зв'язку з появою малорозмірних безпілотних літальних повітряних об'єктів [1–3]. Малорозмірним повітряним об'єктам типу керованих ракет (снарядів), керованих авіаційних бомб, крилатих ракет різного виду базування, протирадіолокаційних ракет, безпілотних літальних апаратів притаманні специфічні льотно-технічні характеристики. В першу чергу, це малі ефективні поверхні розсіяння (ЕПР), широкий діапазон швидкостей руху, здійснення скритих польотів на малих та надмалих висотах з використанням рельєфу місцевості [3–5]. Указані особливості значно ускладнюють задачу виявлення малорозмірних повітряних об'єктів оглядовими радіолокаційними станціями (РЛС).

Використання традиційних методів підвищення ефективності виявлення малорозмірних повітряних об'єктів приводить до збільшення кількості та енергетичного потенціалу РЛС. Отже, при вирішенні задачі виявлення малорозмірних повітряних об'єктів загострилося протиріччя між тенденціями розвитку малорозмірних повітряних об'єктів та можливостями існуючих оглядових РЛС. Тому для вирішення указанного протиріччя актуальна розробка методу виявлення малорозмірних повітряних об'єктів оглядовими РЛС.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для підвищення ефективності радіолокаційного виявлення малорозмірних повітряних об'єктів використовуються наступні методи, які узагальнені в роботі [6]:

- ущільнення розташування РЛС на небезпечних напрямках (створення смуг виявлення малорозмірних повітряних об'єктів);
- використання РЛС усіх діапазонів частот;
- використання РЛС з більшим енергетичним потенціалом та ін.

В [7–10] для підвищення ефективності радіолокаційного виявлення малорозмірних повітряних об'єктів запропоновано використання нових інформаційних технологій:

- послідовно-паралельний електронний огляд зони по куту місця та двомірне електронне сканування діаграми спрямованості антен;
- активні, напівактивні та пасивні на передачу фазовані антенні решітки;
- цифровий синтез зондуючих сигналів з різними параметрами: несучою частотою, видом модуляції, шириною смуги, тривалістю, частотою посилок імпульсів;
- цифрове діаграмоутворення фазованої антенної решітки на прийом;
- автоматичний аналіз завадової обстановки та адаптивний вибір засобів та режимів захисту від завад;
- автоматична топографічна прив'язка та орієнтування РЛС по інформації космічних навігаційних систем;
- комплексування РЛС з засобами вторинної радіолокації;
- можливість нарощування РЛС до активно-пасивного комплексу.

Використання наведених вище відомих методів та нових інформаційних технологій підвищення ефективності виявлення малорозмірних повітряних об'єктів приводить до збільшення потрібної кількості, потужності та технологічної складності РЛС.

В [10–16] розглянуто альтернативні шляхи підвищення якості виявлення малорозмірних повітряних об'єктів:

- використання багатопозиційних систем;
- використання енергій сторонніх джерел випромінювання;
- використання властивості збільшення ЕПР при резонансному відбитті електромагнітних хвиль від повітряного об'єкта;
- використання властивостей збільшення бістатичної ЕПР вторинного випромінювання у порівнянні з ЕПР зворотного вторинного випромінювання.

В [11–13] розглянуто виявлення повітряних об'єктів в мультистатичних та бістатичних системах пасивної локації. Наведені практичні рекомендації щодо побудови таких систем та експериментальні дані щодо виявлення повітряних об'єктів.

Методи багатопозиційної радіолокації та їх практичне використання для підвищення ефективності виявлення та визначення координат повітряних об'єктів розглянуто в [14–16]. Особливостями багатопозиційних радіолокаційних систем є використання просторово-часових методів обробки сигналів, які приймаються одночасно в просторово-рознесених точках прийому. При цьому використовуються як активні, так і пасивні методи прийому. В [15] викладена статистична теорія виявлення, визначення координат об'єктів, визначення принципів міжпозиційного ототожнення одиничних вимірювань та траєкторій повітряних об'єктів. В [16] розвинуті методи об'єднання радіолокаційної інформації в багатопозиційних радіолокаційних системах. Основні переваги використання багатопозиційних радіолокаційних систем у порівнянні з однопозиційними РЛС наступні:

- підвищення живучості системи за рахунок просторового рознесення приймальних і передавальних позицій;
- можливість формування і динамічного керування необхідною зоною огляду;
- можливість підвищення точності вимірювання просторових координат повітряних об'єктів за рахунок використання далекомірних методів;
- підвищення надійності за рахунок надлишкового числа приймальних і передавальних позицій та інші.

В багатопозиційних системах, що працюють за принципом активної локації, у якості елементів системи використовується типові РЛС [14–16]. Це вимагає збільшення потрібної кількості РЛС та вартості багатопозиційної системи.

В [17–20] в якості передавача в багатопозиційній системі використовується передавач, що не входить до складу системи (зовнішній передавач):

- передавач сигналу стандарту LTE (Long-Term Evolution) – бездротової високошвидкісної системи передачі даних для мобільних телефонів та інших терміналів [17];
- передавач сигналу супутників, що знаходяться на геостационарній орбіті [18];
- передавач сигналу стандарту DVB-T (Digital Video Broadcasting — Terrestrial) ефірного цифрового телебачення [19];
- передавач сигналу технології WiFi (Wireless Fidelity) стандарту IEEE 802.11 [20].

В системах [17–20] забезпечуються мінімальні енергетичні витрати на функціонування системи. В [17–20] розглянуто принципи побудови та варіанти практичної реалізації рознесених радіолокаційних систем, які працюють в полі підсвічування сторонніх передавачів в різних діапазонах довжин хвиль. Отримано вирази для оцінювання потенційних можливостей рознесених радіолокаційних систем щодо виявлення та визначення координат повітряних об'єктів, наведені залежності характеристик рознесених радіолокаційних систем від параметрів сигналу підсвічування.

Подальший розвиток радіолокаційних систем здійснюється в напрямку поєднання властивостей окремих видів радіолокаційних систем в єдині активно-пасивні багатопозиційні радіолокаційні системи. В таких комплексах проводиться кооперативна обробка радіолокаційної інформації. Варіант організації кооперативної обробки радіолокаційної інформації в активно-пасивній радіолокаційній системі для підвищення ймовірності виявлення повітряних об'єктів розглянуто в [21, 22].

В [23] для підвищення ефективності виявлення малорозмірних повітряних об'єктів розглянута можливість збільшення ЕПР малорозмірних повітряних об'єктів в оглядових РЛС. Для цього використовується властивість бістатичної ЕПР повітряного об'єкту при рознесеному прийомі сигналів від сторонніх джерел випромінювання. За результатами проведених досліджень [23] щодо порівняння бістатичної та моностатичної ЕПР повітряних об'єктів, встановлено:

- при значеннях бістатичних кутів менше 136 градусів, значення бістатичної ЕПР не перевищує, а в деяких випадках менше на 2–5 дБ, значень моноста-

тичної ЕПР, що приводить к погіршенню можливостей РЛС по виявленню повітряних об'єктів;

- при значеннях бістатичних кутів близьких до 180 градусів значення бістатичної ЕПР значно перевищує значення моностатичної ЕПР (до 30 дБ), що покращує можливості РЛС по виявленню малорозмірних повітряних об'єктів;

- порізаність діаграми бістатичного розсіювання менше за порізаність діаграми моностатичного розсіювання, що зменшує мерехтіння (шум) об'єкту та зменшує його вплив на похибки вимірювання координат об'єкту;

- для об'єктів, які виконанні за технологією «Стелс», спостерігається збільшення значень бістатичної ЕПР у порівнянні з моностатичною ЕПР.

Таким чином, проведений аналіз літератури за темою дослідження показав, що в недостатній мірі дослідженими залишаються питання побудови і функціонування активної оглядової РЛС під час роботи в режимах однопозиційної та рознесеної радіолокації повітряних об'єктів. Також у відомих роботах не розглядається можливість комплексного використання можливості локації повітряних об'єктів у режимах моностатичного та бістатичного виявлення. Не розглянутим залишається питання поєднання властивостей моностатичної та бістатичної ЕПР повітряних об'єктів. Це призведе до підвищення ефективності виявлення малорозмірних повітряних об'єктів.

3. Ціль та задачі дослідження

Ціллю дослідження є підвищення ефективності виявлення малорозмірних повітряних об'єктів за рахунок введення в існуючу однопозиційну оглядову РЛС додаткового режиму рознесеного прийому.

Для досягнення поставленої цілі необхідно вирішити наступні задачі:

- удосконалити алгоритм виявлення повітряного об'єкта при його опроміненні декількома передавачами;

- розробити структурну схему виявлювача, який реалізує виявлення повітряного об'єкта із використанням підсвічування об'єкта декількома передавачами та провести оцінку показників якості виявлення повітряного об'єкта при його опроміненні декількома передавачами;

- провести вибір кількості каналів прийому, що об'єднуються;

- побудувати структурну схему каналів обробки ехо-сигналів оглядової РЛС при об'єднанні методів однопозиційного та рознесеного прийому сигналів.

4. Удосконалений алгоритм виявлення повітряного об'єкта при його опроміненні декількома передавачами

Для вирішення задачі виявлення повітряного об'єкта при введенні додаткового режиму рознесеного прийому необхідно забезпечити в РЛС реалізацію алгоритму виявлення об'єкта при його опроміненні декількома передавачами. Для цього в РЛС необхідно реалізувати відповідні канали обробки ехо-сигналів, які зумовлені випромінюванням власних та сторонніх передавачів:

- канал обробки ехо-сигналів, що відбиті від повітряного об'єкта при його опроміненні передавачем, який суміщений з приймальним пристроєм;

– канали обробки ехо-сигналів, що відбиті від повітряного об'єкта при його опроміненні сторонніми передавачами, які рознесені у просторі.

Для обробки ехо-сигналів від кожного передавача у приймальному пункті повинен бути реалізований окремий канал обробки. Сигнали, що випромінюються рознесеними у просторі передавачами, в загальному випадку можуть бути між собою некогерентними. Флуктуації амплітуд відбитих сигналів в моностатичному та бістатичному режимах відповідають різним розподілам, отже є незалежними.

Алгоритм оптимальної обробки сигналів, які відбиті від повітряного об'єкта в моностатичному та бістатичному режимах, повинен будуватися за принципом некогерентного підсумовування результатів узгодженої обробки із відповідною компенсацією часових та частотних зсувів. Таким чином, в оглядових РЛС для підвищення якості виявлення малорозмірних повітряних об'єктів за рахунок додаткового використання сторонніх джерел випромінювання необхідно удосконалити багатоканальний метод виявлення з некогерентним об'єднанням каналів.

При знаходженні повітряного об'єкта у зоні випромінювання декількох передавальних позицій відбиті від нього ехо-сигнали в точці розташування приймальної позиції представимо у вигляді (1):

$$Y_k(t, \vec{\lambda}) = \{S_{1k}(t, \vec{\lambda}_1), \dots, S_{ik}(t, \vec{\lambda}_i), \dots, S_{Nk}(t, \vec{\lambda}_n)\}, \quad (1)$$

де $Y_k(t, \vec{\lambda})$ – сукупний сигнал в точці розташування приймальної позиції, який обумовлений сигналами, відбитими від повітряного об'єкта, який знаходиться в k -ому роздільному об'ємі; $S_{ik}(t, \vec{\lambda}_i)$ – i -ий тип сигналу, який обумовлений i -им передавачем та відбивається від повітряного об'єкта, який розташований в k -ому роздільному об'ємі; $\vec{\lambda}$ – вектор інформативних параметрів сукупного сигналу, який складається із векторів $\vec{\lambda}_i$; $\vec{\lambda}_i$ – вектор інформативних параметрів ехо-сигналу i -го типу; $i=1, 2, \dots, N$ – кількість типів сигналів, які обумовлені кількістю передавальних позицій, що опромінюють повітряний об'єкт.

Кожний сигнал $S_{ik}(t, \vec{\lambda}_i)$, який входить до складу сукупного сигналу (1) в точці розташування приймальної позиції, є взаємнокорельованим та може бути прийнятий і оброблений відповідним окремим приймальним каналом. Тому, для забезпечення можливості обробки усієї сукупності сигналів $Y_k(t, \vec{\lambda})$, приймальний пункт повинен складатися із сукупності певних каналів обробки. Кожен приймальний канал функціонує за алгоритмом (2):

$$\tilde{Z}_i = \int_0^T \{Y_k(t, \vec{\lambda}) - \hat{D}_{ik}(t, \vec{\lambda}_i)\} X_{ik}(t, \vec{\lambda}_i) dt, \quad (2)$$

де \tilde{Z}_i – результат узгодженої обробки ехо-сигналу i -го типу, що приймається від повітряного об'єкту, який розташований в k -ому роздільному об'ємі; $Y_k(t, \vec{\lambda})$ – сукупний вхідний сигнал на виході приймача, який відбивається від повітряного об'єкту, що розташований в k -му роздільному об'ємі; $\hat{D}_{ik}(t, \vec{\lambda}_i)$ – середньоквадратична оцінка перешкодових компонентів вхідного сигналу, яка формується на виході компенсатора перешкод для i -го каналу обробки та k -го роздільного об'єму; $X_{ik}(t, \vec{\lambda}_i)$ – очікуємий (опорний) сигнал i -го типу для k -го роздільного об'єму.

Алгоритм оптимальної обробки у випадку одного каналу прийому може бути представлений у вигляді (1) та (2) [15]:

$$L_1 = \frac{1}{N_1^2} |\tilde{Z}_1|^2, \quad (3)$$

$$L_2 = \frac{1}{N_1} |\tilde{Z}_1|^2, \quad (4)$$

де L_1, L_2 – відношення правдоподібності при слабких та сильних сигналах, відповідно; N_1 – одностороння спектральна густина потужності білого шуму в каналі прийому; \tilde{Z}_1 – результат узгодженої обробки прийнятих сигналів в каналі прийому.

У випадку m каналів обробки алгоритм оптимальної обробки, який буде-тьс-я за принципом некогерентного підсумовування результатів узгодженої обробки відповідних ехо-сигналів, може бути представлений виразами (3) та (4):

$$L_1 = \sum_{i=1}^m \frac{A_{i1}^2}{N_i^2} |\tilde{Z}_i|^2, \quad (5)$$

$$L_2 = \sum_{i=1}^m \frac{1}{N_i} |\tilde{Z}_i|^2, \quad (6)$$

де L_1, L_2 – відношення правдоподібності при слабких та сильних сигналах, відповідно; $A_{i1} = \frac{P_i}{P_1}$ – відношення середніх потужностей сигналів в i -му і в першому каналах; N_i – одностороння спектральна густина потужності білого шуму в i -му каналі; \tilde{Z}_i – результат узгодженої обробки прийнятих сигналів в i -му каналі; m – кількість некогерентних каналів обробки.

Оптимальна обробка (5) та (6), яка забезпечує виявлення повітряного об'єкта при його опромінюванні декількома передавачами, зводиться до узгодженої обробки прийнятих ехо-сигналів, квадратичного детектування в кожно-

му каналі обробки та ваговому підсумовуванню виходів детекторів всіх каналів. Вагові коефіцієнти залежать від відношення сигнал/шум та спектральної щільності шуму в каналах обробки.

Канали обробки знаходяться в одному приймальному пункті, але випромінювачі зондувальних сигналів, які обумовлюють ехо-сигнали відповідних каналів обробки, рознесені у просторі. Отже, ехо-сигнали, які відбиваються від одного повітряного об'єкта та обумовлені зондувальними сигналами, що випромінюються з просторово-рознесених позицій, в приймальній позиції будуть мати різні час запізнення та частоту Допплера. Тому, на відміну від виразів (5) та (6), некогерентне підсумовування необхідно здійснювати окремо для кожного роздільного об'єму оглядової РЛС. При цьому необхідно передбачити попередню компенсацію часового запізнення та частоти Допплера в кожному приймальному каналі до роздільного об'єму оглядової РЛС. Враховуючі це, вирази (5) та (6) приймають вигляд (7) та (8) відповідно:

$$L_1(d_k, \beta_k, \varepsilon_k, F_{D_k}) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{A_{i1}^2(d_k, \beta_k, \varepsilon_k, F_{D_k})}{N_i^2(d_k, \beta_k, \varepsilon_k, F_{D_k})} |\tilde{Z}_i(d_k, \beta_k, \varepsilon_k, F_{D_k})|^2 \right), \quad (7)$$

$$L_2(d_k, \beta_k, \varepsilon_k, F_{D_k}) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{N_i(d_k, \beta_k, \varepsilon_k, F_{D_k})} |\tilde{Z}_i(d_k, \beta_k, \varepsilon_k, F_{D_k})|^2 \right), \quad (8)$$

де $L_1(d_k, \beta_k, \varepsilon_k, F_{D_k})$, $L_2(d_k, \beta_k, \varepsilon_k, F_{D_k})$ – відношення правдоподібності при слабких та сильних сигналах у k -ому роздільному об'ємі з координатами $(d_k, \beta_k, \varepsilon_k)$ та k -ої частоті Допплера F_{D_k} , відповідно; $d_k, \beta_k, \varepsilon_k$ – дальність, азимут та кут місця, які відповідають k -ому роздільному об'єму оглядової РЛС; F_{D_k} – частота Допплера, яка відповідає k -ому роздільному каналу по частоті Допплера; $A_{i1}(d_k, \beta_k, \varepsilon_k, F_{D_k})$ – відношення середніх потужностей сигналів в i -му і першому каналі для k -ого роздільного об'єму та k -ої роздільної частоті Допплера оглядової РЛС; $N_i(d_k, \beta_k, \varepsilon_k, F_{D_k})$ – одностороння спектральна щільність потужності білого шуму в i -му каналі в елементі, який відповідає k -ому роздільному об'єму та k -ої роздільної частоті Допплера оглядової РЛС; $\tilde{Z}_i(d_k, \beta_k, \varepsilon_k, F_{D_k})$ – результат узгодженої обробки прийнятих сигналів в i -му каналі в елементі, який відповідає k -ому роздільному об'єму та k -ої роздільної частоті Допплера оглядової РЛС.

Як видно з виразів (7) та (8), кожний приймальний канал сигналу i -го типу повинен бути багатоканальним по дальності (часу запізнення) та швидкості (частоті Допплера).

Отже, удосконалений алгоритм виявлення повітряного об'єкта при його опроміненні декількома передавачами зводиться до:

- узгодженої обробки прийнятих сигналів в кожному каналі обробки в кожному елементі, який відповідає відповідному роздільному об'єму та відповідній роздільній частоті Допплера;
- квадратичному детектуванні в кожному каналі обробки в кожному елементі, який відповідає відповідному роздільному об'єму та відповідній роздільній частоті Допплера;
- ваговому підсумовуванню виходів детекторів кожному каналі обробки в кожному елементі, який відповідає відповідному роздільному об'єму та відповідній роздільній частоті Допплера.

5. Структурна схема виявлювача повітряного об'єкта при підсвічуванні об'єкта декількома передавачами

З аналізу виразів (2), (7), (8) видно, що кожний приймальний канал сигналу i -го типу повинен бути багатоканальним по дальності (часу запізнення) та швидкості (частоті Допплера). Структурна схема виявлювача, який реалізує алгоритми виявлення повітряного об'єкта за виразами (2), (7), (8) із використанням підсвічування повітряного об'єкта декількома просторово-рознесеними передавачами, наведена на рис. 1. Сигнал Y_k , що приймається антеною i -го приймального каналу, поступає в блок \hat{D}_i оцінювання компонентів, які є перешкодами для сигналу i -го типу, та блоки $t_{1i} \dots t_{Mi}$ формування каналів дальності для сигналу i -го типу.

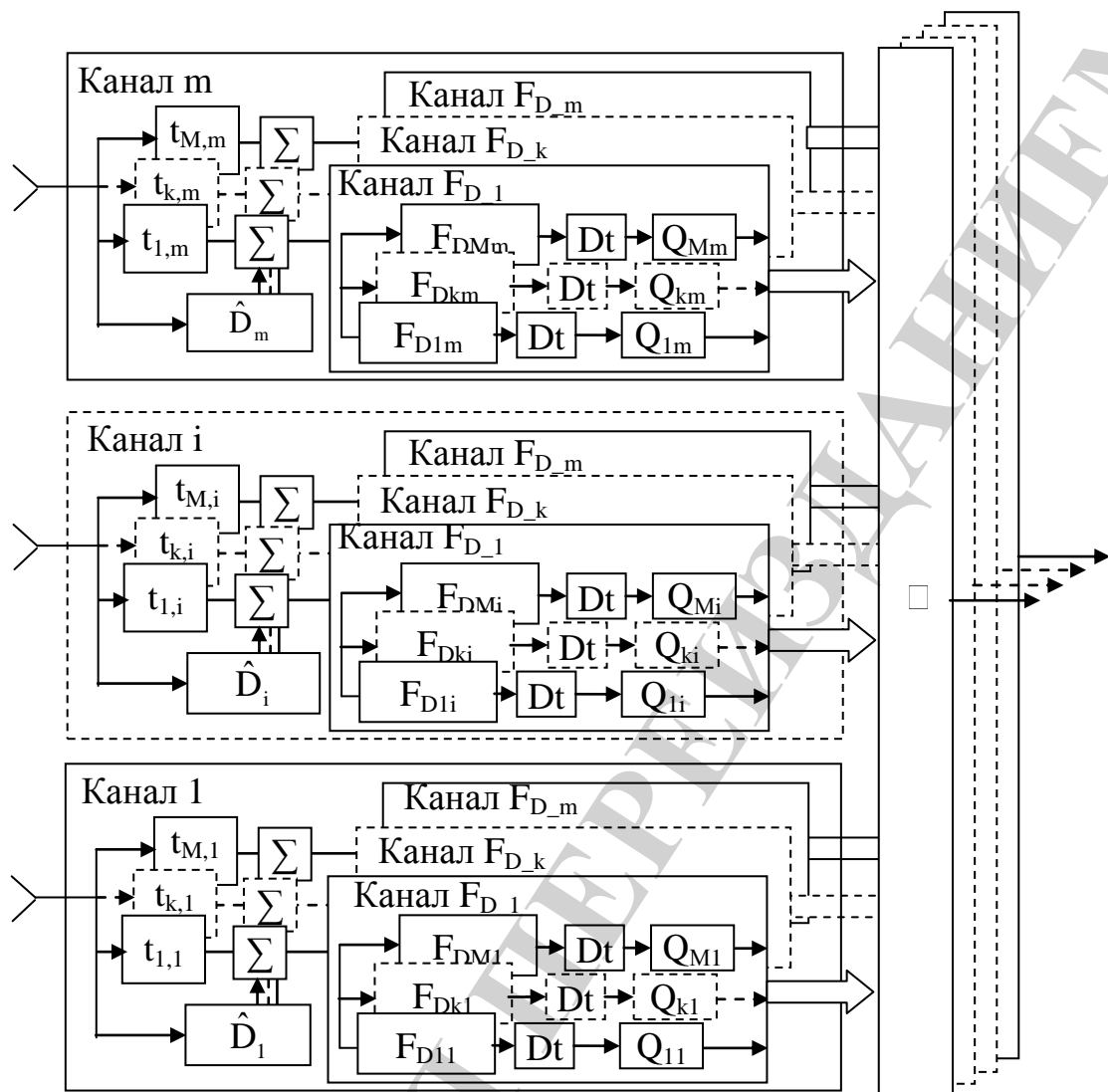


Рис. 1. Структурна схема виявлювача при використанні підсвічування повітряного об'єкта декількома просторово-рознесеними передавачами

В кожному каналі дальності виконуються операції компенсації перешкодових сигналів та формуються канали швидкості $F_{Dl1} \dots F_{DMi}$. На виході швидкісних каналів після амплітудного детектування (літерами «Dt» на рис. 1 позначений «детектор») формується результат узгодженої обробки ехо-сигналу i -го типу, що приймається від повітряного об'єкту, який розташований в k -ому роздільному об'ємі для k -го швидкісного каналу. Результати узгодженої обробки ехо-сигналів поступають на вагове підсумовування. Вагові коефіцієнти (Q_{ki}) формуються для кожного сигналу i -го типу в кожному каналі k -ому дальності та швидкості. На вхід суматора поступають виходи кожного каналу сигналу i -го типу, які відповідають однойменному роздільному об'єму та однойменному каналу швидкості.

Частина структурної схеми виявлювача при використанні підсвічування повітряного об'єкта декількома просторово-рознесеними передавачами, яка відповідає однойменному роздільному об'єму та швидкісному каналу, наведено на рис. 2.

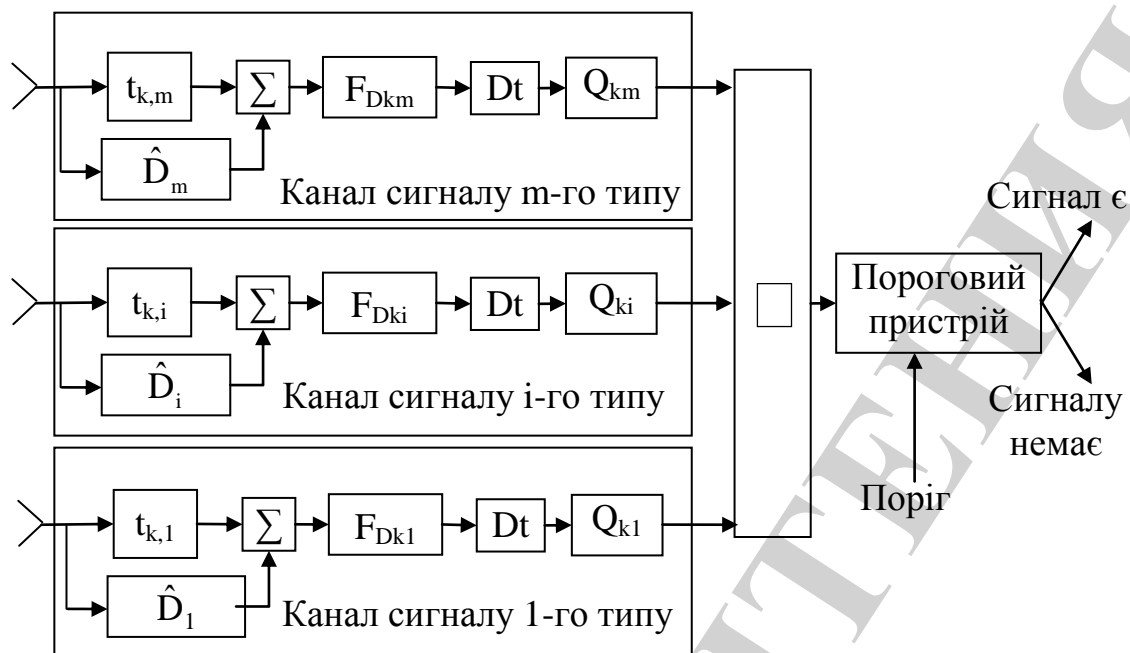


Рис. 2. Структурна схема виявлювача при використанні підсвічування повітряного об'єкта декількома просторово-рознесеними передавачами, яка відповідає одному роздільному об'єму та одному швидкісному каналу

Як видно з рис. 2, при побудові радіолокаційної системи, що складається з однієї приймальної та декількох передавальних позицій, оптимальний виявлювач є багатоканальним. Сигнали приймальних каналів вирівнюються по затримці відповідно до значень запізнювання $t_{k,1} \dots t_{k,m}$, яке обумовлене різними відстанями між приймальною та передавальними позиціями. Вирівняні по затримці сигнали проходять узгоджену обробку та Допплерівську фільтрацію ($F_{Dk1} \dots F_{Dkm}$), детектуються та підсумовуються із ваговими коефіцієнтами ($Q_{k1} \dots Q_{km}$). Значення коефіцієнтів залежать від відношення сигнал/шум у каналах обробки.

З виходу суматора накопичений по каналах сигнал (обчислене відношення правдоподібності) подається на пороговий пристрій, де порівнюється з порогом, величина якого залежить від обраного критерію виявлення (мінімум середнього ризику, мінімакський, Неймана-Пірсона, ідеального спостерігача та інші). Залежно від перевищення або не перевищення порогу приймається рішення про наявність або відсутність повітряного об'єкта в k -ому роздільному об'ємі та k -ому швидкісному каналу.

Таким чином, для виявлення малорозмірних повітряних об'єктів в оглядових РЛС при використанні випромінювання сторонніх джерел необхідно забезпечити прийом, узгоджену обробку ехо-сигналів сторонніх джерел, компенсацію різниць в затримці та частоті Допплера відносно роздільного об'єму оглядової РЛС та некогерентне вагове підсумовування.

Проведемо оцінку ефективності виявлення повітряного об'єкта при його опроміненні декількома передавачами. У якості показника ефективності

будемо використовувати умовну імовірність правильного виявлення повітряного об'єкта.

При некогерентному об'єднанні m каналів умовна імовірність правильного виявлення визначається виразом (9):

$$D = e^{-\frac{u_0}{2(1+\tilde{q}^2)}} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\left(\frac{u_0}{2}\right)^k}{k!(1+\tilde{q}^2)^k}, \quad (9)$$

де m – кількість некогерентних каналів, що об'єднуються; \tilde{q} – середнє відношення сигнал/шум на виході каналу обробки (приймається однаковим для всіх каналів); u_0 – нормований рівень порогу, який залежить від умовної імовірності хибної тривоги та визначається із виразу (10):

$$F = e^{-\frac{u_0}{2}} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{\left(\frac{u_0}{2}\right)^k}{k!}. \quad (10)$$

На рис. 3 наведені характеристики виявлення, які побудовані за виразами (9), (10) при некогерентному об'єднанні двох (на рис. 3 позначено цифрою 3), трьох (на рис. 3 позначено цифрою 4) та чотирьох (на рис. 3 позначено цифрою 5) каналів прийому. Характеристики побудовані для значення умовної імовірності хибної тривоги $F=10^{-5}$.

На рис. 3 для порівняння також наведені криві виявлення при моностатичному прийомі сигналів (на рис. 3 позначено цифрою 1) та бістатичному прийомі сигналів (на рис. 3 позначено цифрою 2).

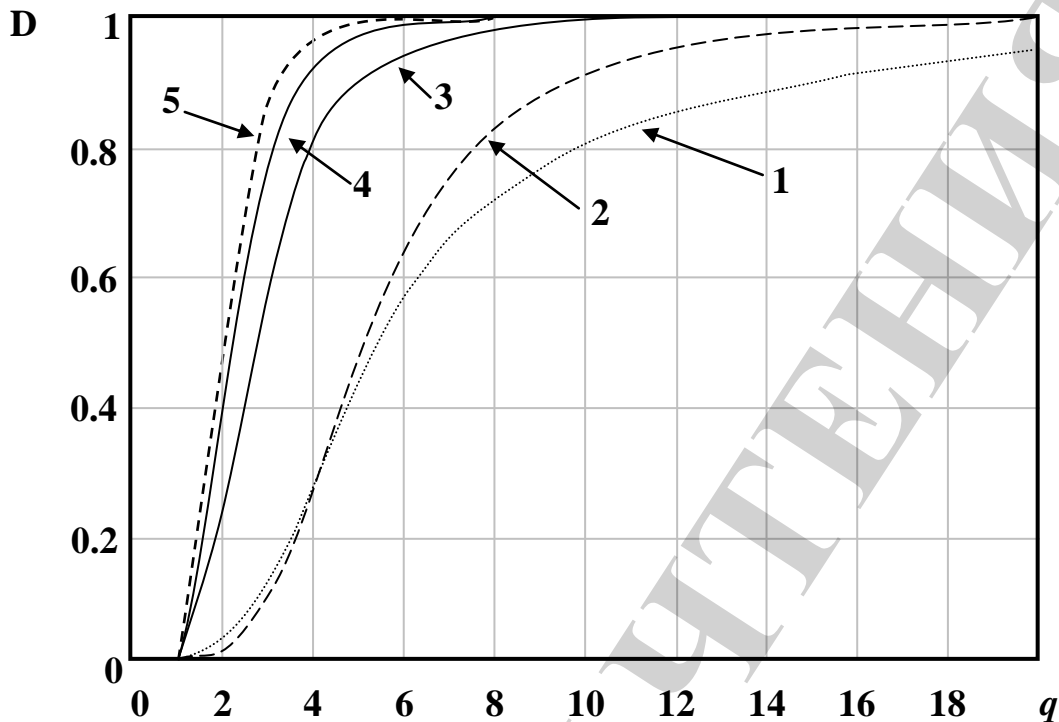


Рис. 3. Характеристики виявлення повітряного об'єкта в каналах для умовної імовірності хибної тривоги $F=10^{-5}$: 1 – моностатичний прийом сигналів; 2 – бістатичний прийом сигналів; 3 – при некогерентному об'єднанні 2-ох каналів; 4 – при некогерентному об'єднанні 3-ох каналів; 5 – при некогерентному об'єднанні 4-ох каналів

Із аналізу характеристик виявлення, зображених на рис. 3, видно, що перехід від одноканального виявлення повітряного об'єкта (криві 1, 2) до виявлення повітряного об'єкта при некогерентному об'єднанні двох каналів (крива 3) приводить до суттєвого зсуву характеристик виявлення вліво. Подальше збільшення кількості каналів, що об'єднуються некогерентно (криві 4, 5), не приводять до суттєвого зсуву характеристик виявлення вліво у порівнянні із характеристикою виявлення при об'єднанні двох каналів (крива 3).

6. Вибір кількості каналів прийому, що об'єднуються

Для вибору оптимальної кількості каналів прийому для некогерентного об'єднання проведемо оцінку виграшу у відношенні сигнал/шум при некогерентному об'єднанні каналів у порівнянні з однопозиційним прийомом сигналів. Такий виграш будемо оцінювати відповідно виразу (11):

$$K_m = 20 \lg \left(\frac{q_1}{\tilde{q}_m} \right), \quad (11)$$

де K_m – виграш у відношенні сигнал/шум при об'єднанні m каналів відносно однопозиційному прийому (із відношенням сигнал/шум q_1); q_1 – відношення си-

гнал/шум при однопозиційному прийомі, яке потрібне для забезпечення заданих показників якості виявлення повітряного об'єкта без використання додаткових каналів; \tilde{q}_m – відношення сигнал/шум, яке потрібне для забезпечення заданих показників якості виявлення повітряного об'єкта при некогерентному об'єднанні m каналів.

На рис. 4 наведено залежність енергетичного виграшу K_m у потрібному відношенні сигнал/шум для забезпечення показників якості виявлення повітряного об'єкта $D=0,8$; $F=10^{-5}$ при некогерентному об'єднанні каналів від кількості каналів, що об'єднуються. Розрахунки проводилися за виразом (11).

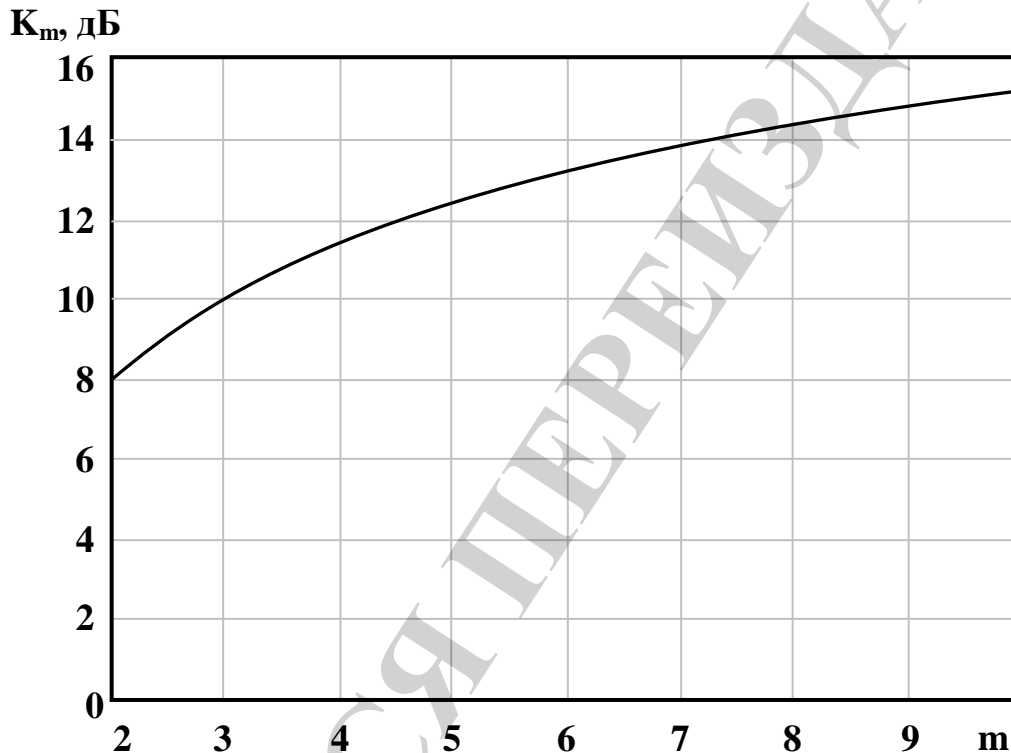


Рис. 4. Виграш у відношенні сигнал/шум при некогерентному об'єднанні каналів відносно відношення сигнал/шум при однопозиційному прийомі (для показників якості виявлення $D=0,8$; $F=10^{-5}$)

Із аналізу залежності виграшу у відношенні сигнал/шум, наведеної на рис. 4, видно, що об'єднання двох каналів забезпечує виграш 8 дБ ($m=2$; $K_m=8$ дБ). Додавання третього каналу забезпечує збільшення виграшу лише на 2 дБ ($m=3$; $K_m=10$ дБ). Подальше збільшення кількості каналів, що об'єднуються, приводить к збільшенню виграшу менш 2 дБ на кожний доданий канал. Тому, за критерієм ефективність-вартість найбільш ефективним є об'єднання двох, максимум трьох каналів (наприклад, однопозиційного та одного або двох бістатичних).

Для вибору оптимальної кількості каналів прийому для некогерентного об'єднання також проведемо розрахунки щодо оцінки виграшу у відношенні сигнал/шум при некогерентному об'єднанні різної кількості каналів обробки

від заданої імовірності правильного виявлення. Для проведення розрахунків використовувалися вирази (9)–(11).

На рис. 5 наведено залежність виграшу K_m у відношенні сигнал/шум від заданої умовної імовірності правильного виявлення при некогерентному об'єднанні різної кількості каналів ($m=2; 3; 4; 10$) при $F=10^{-5}$.

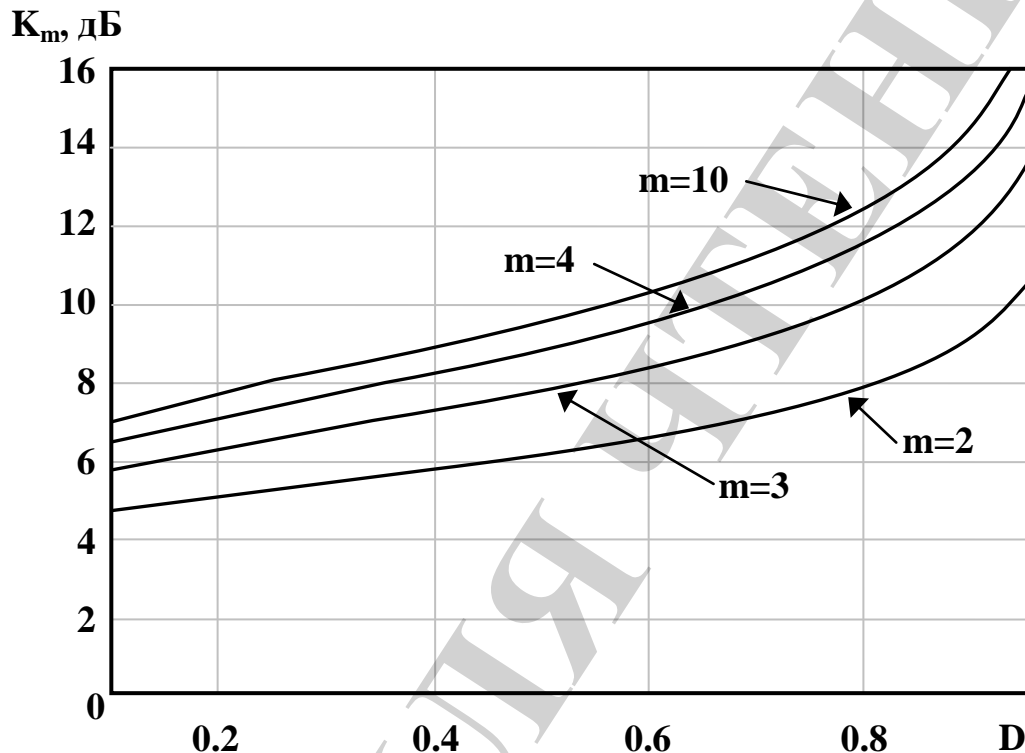


Рис. 5. Виграш у відношенні сигнал/шум при некогерентному об'єднанні m каналів відносно значення сигнал/шум при однопозиційному прийомі (при $F=10^{-5}$)

З аналізу рис. 5, видно, що при збільшенні умовної імовірності правильного виявлення збільшується виграш у відношенні сигнал/шум. Приріст виграшу у відношенні сигнал/шум при $m > 3$ зменшується, що підтверджує недоцільність некогерентного об'єднання більше трьох каналів.

До речі, на користь недоцільності об'єднання більше трьох каналів свідчить також аналіз характеристик виявлення (рис. 3). З рис. 3 видно, що подальше збільшення кількості каналів, що об'єднуються некогерентно (криві 4, 5), не приводять до суттєвого зсуву характеристик виявлення вліво у порівнянні із характеристикою виявлення при об'єднанні двох каналів (крива 3).

7. Структурна схема каналів обробки ехо-сигналів оглядової РЛС

Для забезпечення можливості об'єднання режимів однопозиційної та рознесеної локації в оглядових РЛС необхідно забезпечити комплексування відповідних цифрових приймальних пристроїв та цифрових систем обробки сигналів. Один приймальний пристрій забезпечує приймання та обробку ехо-сигналів, які зумовлені випромінюванням передавального пристрою оглядової РЛС, що від-

повідляє штатному режиму роботи оглядової РЛС. Інший приймальний пристрій забезпечує приймання та обробку ехо-сигналів, які зумовлені випромінюванням зовнішніх джерел, що відповідає реалізації додаткового режиму рознесеної локації. Основним принципом комплексування зазначених приймальних пристроїв повинно бути інформаційне доповнення без порушення штатних режимів функціонування оглядової РЛС. Структурна схема каналів обробки ехо-сигналів оглядової РЛС, яка забезпечує об'єднання режимів однопозиційної та рознесеної локації, наведена на рис. 6.

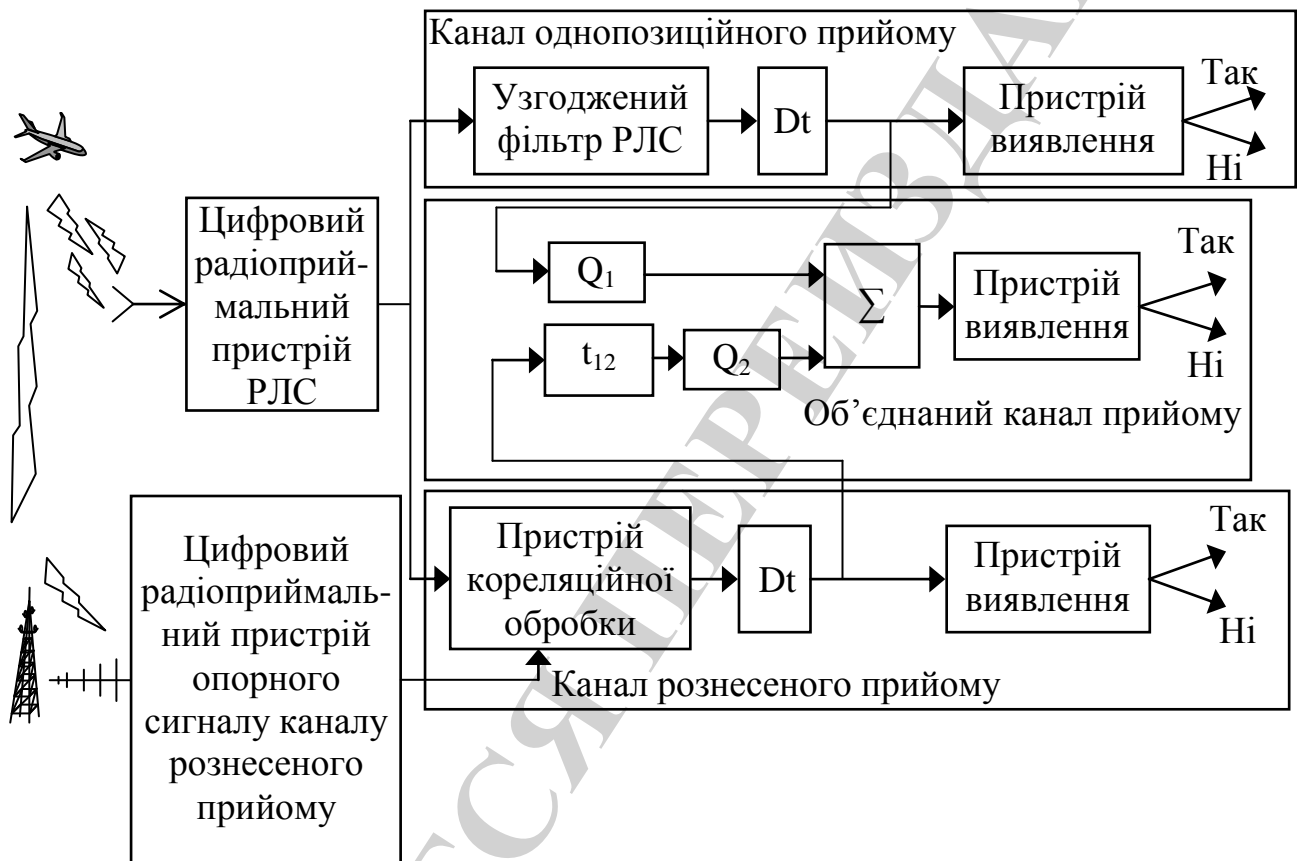


Рис. 6. Структурна схема каналів обробки ехо-сигналів оглядової РЛС, яка забезпечує об'єднання режимів однопозиційної та рознесеної локації

Позначення на рис. 6 наведені вище і відповідають позначенням на рис. 1, 2. Канал однопозиційного прийому, який наведений у верхній частині рис. 6, відповідає штатному каналу приймання та обробки ехо-сигналів оглядової РЛС. Додатковий канал, який наведений у нижній частині рис. 6, відповідає каналу рознесеного прийому. Він забезпечує об'єднання режимів однопозиційної та рознесеної локації в оглядовій РЛС. На вхід додаткового каналу поступають сигнали, що прийняти антеною оглядової РЛС та антеною приймача опорного сигналу каналу рознесеного прийому. За результатами кореляційної обробки зазначених сигналів приймається рішення про виявлення повітряного об'єкта в режимі рознесеного прийому. Для реалізації об'єднання режимів однопозиційної та рознесеної локації призначений об'єднаний канал. В об'єднаний канал поступають результати обробки ехо-сигналів в основному та додатковому ка-

налах. Після об'єднання результатів обробки ехо-сигналів основного та додаткового каналів в пристрої виявлення об'єднаного каналу приймається рішення про виявлення повітряного об'єкта при об'єднанні режимів однопозиційної та рознесеної локації.

7. Обговорення результатів введення в існуючу однопозиційну оглядову РЛС додаткового режиму рознесенного прийому

В роботі запропоновано введення в існуючу однопозиційну оглядову РЛС додаткового режиму рознесенного прийому. Це дозволило підвищити ефективність виявлення малорозмірних повітряних об'єктів.

Перевагами даного дослідження є:

- удосконалення алгоритму виявлення повітряного об'єкта при його опроміненні декількома передавачами;
- розробка структурної схеми виявлювача повітряного об'єкта при підсвічуванні об'єкта декількома передавачами. При цьому вдалося врахувати багатоканальність кожного приймального каналу по дальності та швидкості;
- вибір кількості каналів прийому, що об'єднуються. Кількість каналів прийому обрано шляхом аналізу виграшу у відношенні сигнал/шум при некогерентному об'єднанні каналів відносно відношення сигнал/шум при однопозиційному прийомі; шляхом оцінки виграшу у відношенні сигнал/шум при некогерентному об'єднанні різної кількості каналів обробки від заданої імовірності правильного виявлення та шляхом проведення оцінки характеристик виявлення повітряного об'єкта;
- структурна схема каналів обробки ехо-сигналів оглядової РЛС. При цьому існує можливість роботи оглядової РЛС в штатному режимі, в режимі бістатичного прийому та в режимі об'єднання каналів прийому. Вибір режимів роботи може бути здійснений оператором РЛС в залежності від повітряної обстановки і завдань, що вирішуються РЛС.

При проведенні дослідження були накладені наступні основні обмеження та припущення:

- розглядається робота лише оглядової РЛС;
- відношення сигнал/шум у всіх додаткових каналах рознесенного прийому приймається однаковим;
- не враховується тип перешкодових компонентів вхідного сигналу;
- неврахування впливу прямого сигналу від зовнішнього джерела випромінювання на основний канал прийому оглядової РЛС.

Розвиток даного дослідження може полягати у наступному:

- для забезпечення функціонування додаткового каналу в умовах впливу прямого сигналу від зовнішніх джерел випромінювання необхідно провести дослідження щодо розробки автокомпенсатору прямого сигналу;
- для забезпечення селекції повітряних об'єктів на фоні місцевих предметів необхідно провести дослідження щодо забезпечення доплерівської фільтрації ехо-сигналів за допомогою набору доплерівських фільтрів на основі швидкого перетворення Фур'є;

– проведення дослідження щодо забезпечення синхронізації роботи основного та додаткового каналів оглядової РЛС.

7. Висновки

1. Удосконалено алгоритм виявлення повітряного об'єкта при його опроміненні декількома передавачами. Для цього реалізовано відповідні канали обробки ехо-сигналів:

- канал обробки ехо-сигналів, що відбиті від повітряного об'єкта при його опроміненні передавачем, який суміщений з приймальним пристроєм;
- канали обробки ехо-сигналів, що відбиті від повітряного об'єкта при його опроміненні сторонніми передавачами, які рознесені у просторі.

При удосконаленні алгоритму передбачено попередню компенсацією часового запізнення та частоти Допплера в кожному приймальному каналі до роздільного об'єму оглядової РЛС.

Удосконалений алгоритм виявлення повітряного об'єкта при його опроміненні декількома передавачами зводиться до:

- узгодженої обробки прийнятих сигналів в кожному каналі обробки в кожному елементі, який відповідає відповідному роздільному об'єму та відповідній роздільній частоті Допплера;
- квадратичному детектуванні в кожному каналі обробки в кожному елементі, який відповідає відповідному роздільному об'єму та відповідній роздільній частоті Допплера;
- ваговому підсумовуванню виходів детекторів кожному каналі обробки в кожному елементі, який відповідає відповідному роздільному об'єму та відповідній роздільній частоті Допплера.

2. Побудована структурна схема виявлювача повітряного об'єкта при підсвічуванні об'єкта декількома передавачами. Кожний приймальний канал сигналу є багатоканальним по дальності та швидкості. Схема забезпечує прийом, узгоджену обробку ехо-сигналів сторонніх джерел, компенсацію різниць в затримці та частоті Допплера відносно роздільного об'єму оглядової РЛС та некогерентне вагове підсумовування.

Проведено оцінку ефективності виявлення повітряного об'єкта при його опроміненні декількома передавачами. У якості показника ефективності використано умовну імовірність правильного виявлення повітряного об'єкта. Побудовані характеристики виявлення повітряного об'єкта при різній кількості каналів прийому. Встановлено, що перехід від одноканального виявлення повітряного об'єкта до виявлення повітряного об'єкта при некогерентному об'єднанні двох каналів приводить до суттєвого зсуву характеристик виявлення вліво. Подальше збільшення кількості каналів, що об'єднуються некогерентно, не приводять до суттєвого зсуву характеристик виявлення вліво у порівнянні із характеристикою виявлення при об'єднанні двох каналів.

3. Проведено вибір кількості каналів прийому, що об'єднуються. Встановлено, що найбільш ефективним є об'єднання двох, максимум трьох каналів (наприклад, однопозиційного та одного або двох бістатичних).

4. Побудовано структурна схема каналів обробки ехо-сигналів оглядової РЛС при об'єднанні методів однопозиційного та рознесеного прийому сигналів. Для об'єднання режимів однопозиційної та рознесеної локації в оглядових РЛС забезпечено комплексування відповідних цифрових приймальних пристроїв та цифрових систем обробки сигналів. Основним принципом комплексування зазначених приймальних пристроїв є інформаційне доповнення без порушення штатних режимів функціонування оглядової РЛС.

Література

1. Bachmann S.-D., Gunneriusson H. Hybrid War: The 21st Century's New Threats to Global Peace and Security // *Scientia Militaria – South African Journal of Military Studies*. 2015. Vol. 43, Issue 1. P. 77–98. doi: 10.5787/43-1-1110
2. Stillion J. Trends in air-to-air combat: implications for future air superiority. Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2015. 76 p.
3. Udeanu G., Dobrescu A., Oltean M. Unmanned aerial vehicle in military operations // *Scientific research and education in the air force*. 2016. Vol. 18, Issue 1. P. 199–206. doi: 10.19062/2247-3173.2016.18.1.26
4. Segmentation of the images obtained from onboard optoelectronic surveillance systems by the evolutionary method / Ruban I., Khudov H., Khudov V., Khizhnyak I., Makoveichuk O. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5, Issue 9 (89). P. 49–57. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109904
5. Zaloga S. J., Rockwell D., Finnegan P. World Military Unmanned Aerial Systems Market Profile & Forecast. Teal Group Corporation, 2017. 583 p.
6. Radar Handbook / M. I. Skolnik (Ed.). 3rd ed. USA: McGraw-Hill, 2008. 1351 p.
7. Principles of Modern Radar: Basic principles / M. A. Richards, J. A. Scheer, W. A. Holm (Eds.). Raleigh: SciTech Publishing, 2010. 960 p. doi: 10.1049/sbra021e
8. Principles of Modern Radar: Advanced techniques / W. L. Melvin, J. A. Scheer (Eds.). Raleigh: SciTech Publishing, 2012. doi: 10.1049/sbra020e
9. Principles of Modern Radar: Volume 3: Radar Applications / W. L. Melvin, J. A. Scheer (Eds.). Raleigh: SciTech Publishing, 2013. 820 p. doi: 10.1049/sbra503e
10. Technology Trends for Future Radar. URL: <http://www.microwavejournal.com/articles/29367-technology-trends-for-future-radar>
11. Willis N. J. Bistatic Radar, Second Edition. Raleigh: SciTech Publishing, 2004. doi: 10.1049/sbra003e
12. Passive Radar – From Inception to Maturity. URL: <http://in.bgu.ac.il/en/engn/ece/radar/Radar2017/Documents/Prof.%20Hugh%20Griffiths%20-%20Passive%20Radar%20-%20From%20Inception%20to%20Maturity.pdf>
13. Griffiths H. D., Baker C. J. An Introduction to Passive Radar. Artech House, 2017. 234 p.
14. Detection-Localization Tradeoff in MIMO Radars / Nazari Majd M., Radmard M., Chitgarha M. M., Bastani M. H., Nayebi M. M. // *Radioengineering*. 2017. Vol. 26, Issue 2. P. 581–587. doi: 10.13164/re.2017.0581

15. Черняк В. С. Многопозиционные радиолокационные системы на основе MIMO РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 8. С. 29–46.
16. Resource Allocation in MIMO Radar With Multiple Targets for Non-Coherent Localization / Garcia N., Haimovich A. M., Coulon M., Lops M. // IEEE Transactions on Signal Processing. 2014. Vol. 62, Issue 10. P. 2656–2666. doi: 10.1109/tsp.2014.2315169
17. Raja Abdullah R. S. A., Salah A. A., Abdul Rashid N. E. Moving Target Detection by Using New LTE-Based Passive Radar // Progress In Electromagnetics Research B. 2015. Vol. 63. P. 145–160. doi: 10.2528/pierb15070901
18. Mytsenko I. M., Khalameyda D. D. Bistatic radar system using radio signals of geostationary satellite low noise blocks // Telecommunications and Radio Engineering. 2017. Vol. 76, Issue 14. P. 1239–1245. doi: 10.1615/telecomradeng.v76.i14.30
19. Multi-Frequency Target Detection Techniques for DVB-T Based Passive Radar Sensors / Martelli T., Colone F., Tilli E., Di Lallo A. // Sensors. 2016. Vol. 16, Issue 10. P. 1594. doi: 10.3390/s16101594
20. Parasitic Exploitation of Wi-Fi Signals for Indoor Radar Surveillance / Pastina D., Colone F., Martelli T., Falcone P. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2015. Vol. 64, Issue 4. P. 1401–1415. doi: 10.1109/radar.2015.7131136
21. Bliss D. W. Cooperative radar and communications signaling: The estimation and information theory odd couple // 2014 IEEE Radar Conference. 2014. doi: 10.1109/radar.2014.6875553
22. Radar Waveform Optimization for Cooperative Radar and Communications Joint Receiver / Ragi S., Chiriyath A. R., Bliss D. W., Mittelman H. D. // URL: http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2017/10/6271.pdf
23. Ковалевський С. М., Тютюнник В. О., Худов Г. В. Метод розрахунку ефективної поверхні розсіяння малорозмірних повітряних об'єктів при однопозиційному та рознесеному прийомі сигналів в оглядових радіолокаційних станціях // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. 2015. Вип. 2 (43). С. 28–31.